Journal of Agroecology
Homepage: http://agry.um.ac.ir

Research Article
Vol. 16, No. 3, 2024, p. 421-438

Effect of Simultaneous Use of Different Amounts of Biochar and Soil Application of Common Sulfur and Spraying of Nanosulfur on Yield and Yield Components and Some Phytochemical Characteristics of Savory (*Satureja hortensis* L.)

Vahid Mohammadzadeh Kakhki[1], Mohammad Hossein Aminifard[2] and Mohammad Behzad Amiri[3*]

1- M.Sc. Graduate, Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.
2- Associate Professor, Department of Special Plants, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.
3- Associate Professor, Department of Plant Production, University of Gonabad, Gonabad, Iran.
(*- Corresponding author's Email: amiri@gonabad.ac.ir)

Received: 30-05-2023
Revised: 26-07-2024
Accepted: 01-09-2024
Available Online: 0۹-۱۱-2024

How to cite this article:
Mohammadzadeh Kakhki, V., Aminifard, M. H., & Amiri, M. B. (2024**).** Effect of simultaneous use of different amounts of biochar and soil application of common sulfur and spraying of nanosulfur on yield and yield components and some phytochemical characteristics of savory (*Satureja hortensis* L.). *Journal of Agroecology*, *16*(3), 421- 438. (In Persian with English abstract)
https://doi.org/10.22067/agry.2024.82686.1155

Introduction

Savory (*Satureja hortensis* L.) is an annual aromatic medicinal plant, belongs to the Lamiaceae family. Its essential oil is being used widely in medicine, food, health industries, and therapeutic processes. Additionally, the essential oil is an important part of traditional medicine, in order to treat muscle pains, indigestion, and diarrhea and infection diseases. Also, the relatively high vitamin C and vitamin A content of savory may contribute to long-term health by boosting the natural state of the human immune system.

Biochar is a solid material formed by high-temperature charring of biomass under anaerobic conditions. It has a large specific surface area, high porosity, and abundant nutrients, such as nitrogen, potassium, and calcium. As a result of these properties, the application of biochar as an organic soil amendment has been considered as an option to improve agricultural systems. The great potential of biochar application has also been directly reflected in plant growth and crop productivity. Biochar can potentially remediate salt-affected soils through salt sorption. Specifically, biochar sorption of Na^+ in the soil solution can both reduce plant Na uptake and increase the relative uptake of Ca^{2+} and Mg^{2+}. More broadly, biochar can generally enhance plant growth by improving soil properties, such as cation-exchange capacity (CEC), water retention capacity, and bulk density. By increasing the soil CEC and water-holding capacity (WHC), biochar can reduce fertilizer and water use.

Using sulfur (especially in soil with low sulfur content) not only improves soil properties but also increases plant growth and yield. The biochemical oxidation of elemental sulfur produces sulfuric acid (H_2SO_4) which decreases soil pH and solubilizes $CaCO_3$ in alkaline soils to make soil conditions more favorable for plant growth. Sulfur is a part of an enzyme necessary for nitrogen absorption. Its deficiency can significantly hinder nitrogen metabolism, as both sulfur and nitrogen are required for the formation of amino acids essential for protein synthesis. Sulfur is also

https://doi.org/10.22067/agry.2021.82686.1155

present in fatty acids and vitamins, playing a key role in the quality, taste, and aroma of crops. Nano-fertilization is an agricultural technique used to enhance crop growth, improve nutrient efficiency, and reduce fertilizer waste and costs. It promotes better crop development by providing more surface area for various metabolic reactions in plants, thereby increasing the rate of photosynthesis and overall crop productivity while preventing biotic and abiotic stress.

Material and Methods

To evaluate the combined application of ecological inputs, specifically biochar and sulfur nutritional treatments, on the medicinal plant savory (Satureja hortensis L.), a split-plot experiment based on a randomized complete block design (RCBD) with three replications was conducted over the 2020-2021 and 2021-2022 growing seasons at the Research Field of the University of Gonabad, Iran. The data were analyzed using composite analysis. Different biochar levels (5, 10, and 20 $t.ha^{-1}$, plus a control) and sulfur nutritional treatments (common sulfur, nano-sulfur, and a control) were assigned to the main and subplots, respectively.

Results and Discussion

The results of this study showed that the highest and lowest seed number per m^2 and flowering shoot weight were obtained in treatments of 20 $t.ha^{-1}$ biochar and spraying of nanosulfur (with 27777 seeds per m^2 and 25.67 g flowering shoot, respectively) and non-application of biochar and control (with 8024 seeds per m^2 and 6.24 g flowering shoot, respectively). The results of triple interaction effects of different amounts of biochar, nutritional treatments, and cropping year showed that the highest seed yield (10.74 $g.m^2$) and biological yield (46.91 $g.m^2$) were observed in the first cropping year and treatments of simultaneous application of 20 $t.ha^{-1}$ biochar and spraying of nanosulfur. The results of the interaction effects of biochar and nutritional treatments showed that the highest oil was obtained in the treatment of 10 $t.ha^{-1}$ biochar and soil application of common sulfur. The total phenol, total flavonoid content, and antioxidant activity decreased with the simultaneous application of biochar and sulfur nutritional treatments. The highest levels of these traits were observed when no biochar was applied in combination with the nutritional treatments.

Conclusion

In general, according to the findings of this research, the simultaneous application of high amounts of biochar (levels of 10 and 20 $t.ha^{-1}$) and sulfur nutritional treatments, especially spraying of nano-sulfur led to improvement of yield and yield components, but the qualitative characteristics of savory were reduced due to the combined use of these ecological inputs.

Acknowledgments

This research was financially supported by the University of Birjand, Iran.

Keywords: Biochar; Ecofriendly input, Flowering branch, Medicinal plant, Nano-fertilizer, Total phenol

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: http://agry.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ١٦، شماره ٣، پاییز ١٤٠٣، ص ٤٣٨-٤٢١

اثر مصرف تلفیقی مقادیر مختلف بیوچار و کاربرد خاکی گوگرد معمولی و محلول‌پاشی نانوگوگرد بر عملکرد و اجزاء عملکرد و برخی خصوصیات فیتوشیمیایی مرزه (*Satureja hortensis* L.)

وحید محمدزاده کاخکی[1]، محمد حسین امینی‌فرد[2] و محمد بهزاد امیری[3*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۹
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۱

چکیده

استفاده بی‌رویه از نهاده‌های شیمیایی مخاطرات زیادی برای سلامت انسان و دام به همراه داشته و آلودگی‌های زیست‌محیطی بسیاری در پی داشته است و ازاین‌رو، ضرورت استفاده از نهاده‌های بوم‌سازگار و جایگزین کودهای شیمیایی بیش از هر زمان دیگری احساس می‌شود. به‌منظور بررسی کاربرد همزمان نهاده‌های اکولوژیک بیوچار و تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی در گیاه دارویی مرزه (*Satureja hortensis* L.)، آزمایشی طی دو سال زراعی ۱۴۰۰- ۱۳۹۹ و ۱۴۰۱- ۱۴۰۰ در مزرعه تحقیقاتی مجتمع آموزش عالی گناباد، بر پایه طرح کرت‌های خردشده با سه تکرار انجام و داده‌ها به‌صورت تجزیه مرکب آنالیز شد. سه سطح کود آلی بیوچار (شامل ۵، ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار) و شاهد (عدم استفاده از بیوچار)، در کرت‌های اصلی، و کاربرد خاکی گوگرد، محلول‌پاشی نانوگوگرد و شاهد (عدم استفاده از گوگرد) در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. صفات مورد مطالعه شامل تعداد بذر در بوته، وزن سرشاخه گلدار، عملکرد بذر، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت، میزان اسانس، فنل کل، فلاونوئید کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی بود که در قالب یک چین برداشت شدند. نتایج آزمایش نشان داد که بیشترین و کمترین تعداد بذر در مترمربع و وزن سرشاخه گلدار به‌ترتیب در تیمارهای مصرف ۲۰ تن در هکتار بیوچار و محلول‌پاشی نانوگوگرد (به‌ترتیب با ۲۷۷۷۷ بذر در مترمربع و ۲۵/۶۷ گرم سرشاخه گلدار) و عدم‌کاربرد بیوچار و شاهد (به‌ترتیب با ۸۰۲۴ بذر در مترمربع و ۶/۲۴ گرم سرشاخه گلدار) به‌دست آمد. نتایج اثرات متقابل سه‌گانه مقادیر مختلف بیوچار، تیمارهای تغذیه‌ای و سال زراعی نشان داد که بیشترین عملکرد بذر (۱۰/۷۴ گرم در مترمربع) و عملکرد بیولوژیک (۴۶/۹۱ گرم در مترمربع) زمانی حاصل شد که در سال زراعی اول به‌طور همزمان ۲۰ تن در هکتار بیوچار و محلول‌پاشی نانوگوگرد مورد استفاده قرار گرفت. نتایج اثرات متقابل مقادیر مصرفی بیوچار و تیمارهای تغذیه‌ای نشان داد که بیشترین میزان اسانس در تیمار کاربرد همزمان ۱۰ تن در هکتار بیوچار و مصرف خاکی گوگرد معمولی به‌دست آمد. میزان فنل کل، فلاونوئید کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی تحت تأثیر استفاده همزمان مقادیر بیوچار و تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی کاهش یافت، به‌طوری‌که بیشترین میزان این صفات زمانی حاصل شد که از هیچ مقدار زغال زیستی به‌صورت توأم با تیمارهای تغذیه‌ای استفاده نگردید. به‌طور کلی، با توجه به یافته‌های این پژوهش، کاربرد همزمان مقادیر بالای بیوچار (سطوح ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار) و تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی به‌ویژه محلول‌پاشی نانوگوگرد منجر به بهبود عملکرد و اجزاء عملکرد مرزه شد، ولی ویژگی‌های کیفی این گیاه در صورت عدم استفاده از نهاده‌های خارجی از وضعیت بهتری برخوردار بود.

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
۲-دانشیار، گروه باغبانی و مرکز پژوهشی گیاهان ویژه منطقه، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
۳-دانشیار، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران.
(*- نویسنده مسئول: Email: amiri@gonabad.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/agry.2024.82686.1155

واژه‌های کلیدی: زغال زیستی، سرشاخه گلدار، فنل کل، گیاه دارویی، نانوکود، نهاده بوم‌سازگار

مقدمه

کود آلی بیوچار در راستای نیل به اهداف کشاورزی پایدار عمل کرده و روشی ایده‌آل برای بازیافت ضایعات و پسماندهای مختلف کشاورزی محسوب می‌شود و ضمن در اختیار گذاشتن مواد غذایی، کیفیت خاک را افزایش و سمیت نمک در گیاهان را کاهش می‌دهد. بیوچار، یک ماده جامد غنی از کربن است که از طریق فرآیند پیرولیز (فرآیند تجزیه حرارتی کنترل‌شده) در شرایط بدون اکسیژن تولید می‌شود و قابلیت ماندگاری زیادی در خاک دارد و از مزایایی همچون تخلخل زیاد و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا برخوردار است و می‌تواند سمیت نمک در خاک‌های خشک و نیمه‌خشک را کاهش دهد و این کود، همچنین در تثبیت آلاینده‌های آلی و معدنی نیز نقش مهمی ایفا می‌کند (Ghassemi-Golezani & Rahimzadeh, 2022). کاربرد بیوچار در خاک، با توجه به افزایش حضور گروه‌های عاملی کربوکسیل، فنولیک و هیدروکسیل که دارای اکسیژن‌های سطحی هستند، قادر است آلایندگی حاصل از عناصر سنگین را کاهش و موجب بهبود وضعیت رشدی گیاه شود (Enaime et al., 2020). هزینه کود بیوچار نسبتاً پایین بوده و به‌دلیل عاری بودن از بذور علف‌های هرز و برخورداری از عناصر غذایی، خرید آن مقرون‌به‌صرفه است. در یک پژوهش، کاربرد همزمان بیوچار و سوپرجاذب بر خصوصیات کیفی مرزه رشینگری (*Satureja rechingeri* Jamzad.) بررسی و بیشترین میزان کارواکرول، گاما- ترپینن و لینالول در تیمار کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوچار و ۶۰ میلی‌گرم سوپرجاذب به‌ازای هر بوته مشاهده شد (Beiranvandi et al., 2020). در پژوهشی دیگر، اثر مقادیر مختلف بیوچار بر صفات فیزیولوژیک و عملکرد گیاه دارویی سرخارگل (*Echinacea purpurea* L.) در شرایط تنش خشکی بررسی و گزارش شد که کاربرد بیوچار منجر به افزایش عملکرد بیولوژیک و میزان کلروفیل a نسبت به شاهد شد و به‌طور کلی، استفاده از این نهاده آلی در تخفیف اثرهای منفی ناشی از تنش خشکی مفید بود (Emami, 2022). مهدی‌زاده و همکاران (Mehdizadeh et al., 2019) پس از بررسی اثر بیوچار بر خصوصیات رشدی و نسبت پتاسیم به سدیم مرزه تابستانه تحت‌تنش شوری به این نتیجه رسیدند که بیشترین ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی، تعداد گره، قطر ساقه، وزن تر و خشک ساقه و وزن تر و خشک برگ در تیمار کاربرد دو درصد وزنی خاک هر گلدان بیوچار بدون شوری مشاهده شد و بیوچار با جذب یون‌های نمک سبب بهبود صفات رشدی در تیمارهای شوری گردید. در پژوهشی دیگر، کاربرد سه درصد وزنی خاک هر گلدان بیوچار منجر به تولید بیشترین عملکرد اقتصادی، میزان اسانس و کارواکرول مرزه خوزستانی (*Satureja khuzistanica* Jamzad.) در شرایط شوری هشت دسی‌زیمنس بر متر شد (Eghlima et al., 2024).

گوگرد نقش مهمی در فرآیندهای متابولیسمی گیاه دارد و برای سنتز پروتئین‌های گیاهی، اسیدهای آمینه و برخی ویتامین‌ها و آنزیم‌ها ضروری است. اکثر کودهای گوگردی حاوی نیتروژن هم هستند که این مسئله نشان‌دهنده ارتباط نزدیک این دو عنصر با یکدیگر و فعالیت تعدادی از آنزیم‌های فعال در جذب نیتروژن به وجود گوگرد وابسته است و گوگرد به‌طور قابل توجهی بر کیفیت و طعم و عطر محصولات زراعی اثر می‌گذارد (Narayan et al., 2022). استفاده از نانوکودها یکی از مؤثرترین روش‌های بهبود رشد گیاهان و افزایش کارآیی مصرف عناصرغذایی و کاهش ضایعات کشاورزی است و هزینه‌های تولید محصولات زراعی در نتیجه استفاده بی‌رویه کودهای شیمیایی را به‌شدت کاهش می‌دهد. نانوکود گوگرد از طریق بهبود فعالیت‌های متابولیسمی گیاه، میزان فتوسنتز و در نتیجه، عملکرد کمّی و کیفی گیاه را افزایش داده و اثرات مخرب تنش‌های زنده و غیرزنده روی محصول را به حداقل می‌رساند (Shankar et al., 2020). در پژوهشی الموسوی و جمیل (Almousswi & Jameel, 2022) گزارش کردند که استفاده از گوگرد معمولی و محلول‌پاشی نانوگوگرد کلیه صفات مورد مطالعه (نظیر ارتفاع بوته، سطح برگ و وزن خشک) در گیاه دارویی تره کوهی (*Allium ampeloprasum* L.) را نسبت به شاهد افزایش داد که البته از این نظر کاربرد نانوگوگرد نسبت به گوگرد معمولی نقش مؤثرتری در بهبود خصوصیات کمّی و کیفی گیاه ایفا کرد. کاربرد همزمان هشت میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک آهن و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک گوگرد منجر به تولید بیشترین میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی در مرزه تابستانه شد (Zahedifar & Najafian, 2015). در پژوهشی دیگر،

بیشترین عملکرد اسانس گیاه دارویی نعناع وحشی (*Mentha arvensis* L.) زمانی حاصل شد که از کاربرد همزمان کودهای شیمیایی (NPK) (۱۵۰:۶۰:۴۰)، ۲۵ کیلوگرم در هکتار روی و ۲۵ کیلوگرم در هکتار گوگرد استفاده شد (Deepak et al., 2019).

مرزه گیاه دارویی یک‌ساله و متعلق به خانواده نعناعیان[1] و بزرگ‌ترین تولیدکننده آن کشور چین است. از برگ‌های این گیاه برای تهیه دمنوش استفاده شده و اسانس آن در صنایع عطرسازی کاربرد فراوان دارد و از این گیاه به‌عنوان طعم‌دهنده غذا و برای مصارف دارویی نظیر رفع مشکلات گوارشی و درمان بیماری‌های عفونی و گرفتگی عضلات، استفاده شده (Sanbongi et al., 2003) و به‌دلیل وجود ترکیبات آنتی‌اکسیدانی دارای خاصیت ضدباکتریایی و ضدمیکروبی بوده و آرام‌بخش است. این گیاه همچنین در صنایع غذایی و تولید نوشیدنی کاربردهای گسترده اقتصادی دارد و ازاین‌رو، توجه به کشت‌وکار آن در طی ۳۰- ۲۰ سال گذشته با رشد روزافزونی همراه بوده است (Rodov et al., 2010) که البته نکته حائز اهمیت در تولید این گیاه دارویی ارزشمند با توجه به مصارف دارویی متعددی که دارد، توجه به تولید محصول سالم و با کیفیت و عاری از کودها و سموم شیمیایی این گیاه و جایگزینی این نهاده‌های مخرب با نهاده‌هایی نظیر زغال زیستی (بیوچار)، گوگرد معمولی و نانوگوگرد می‌باشد.

نظر به اهمیت مرزه به‌عنوان یک گیاه دارویی ارزشمند و کاربردهای متعدد آن در صنایع مختلف دارویی، غذایی و آرایشی بهداشتی و ازآنجا که مطالعات چندانی در خصوص مصرف همزمان نهاده‌های اکولوژیک نظیر زغال زیستی، گوگرد معمولی و نانوگوگرد در تولید و پرورش این گیاه مهم صورت نپذیرفته است، این پژوهش با هدف بررسی اثر کاربرد همزمان مقادیر مختلف بیوچار و کاربرد خاکی گوگرد معمولی و محلول‌پاشی نانوگوگرد بر برخی خصوصیات کمّی و کیفی گیاه دارویی مرزه در شرایط گناباد انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در دو سال زراعی ۱۴۰۰- ۱۳۹۹ و ۱۴۰۱- ۱۴۰۰ در مزرعه آموزشی تحقیقاتی مجتمع آموزش عالی گناباد با عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۸ درجه و ۴۵ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۰۶۰ متر از سطح دریا، بر پایه طرح کرت های خردشده با سه تکرار انجام و داده‌ها به‌صورت تجزیه مرکب شد. در هر دو سال زراعی، سه سطح کود آلی بیوچار (شامل ۵، ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار) و شاهد (عدم استفاده از بیوچار)، در کرت‌های اصلی و کاربرد خاکی گوگرد، محلول‌پاشی نانوگوگرد و شاهد (عدم استفاده از گوگرد) در کرت‌های فرعی قرار گرفته و اعمال شدند. ابعاد کرت‌های اصلی ۶ × ۲ متر و ابعاد کرت‌های فرعی ۲ × ۲ متر در نظر گرفته شد. اطلاعات هواشناسی منطقه مورد پژوهش به‌تفکیک سال‌های زراعی در جدول ۱ آورده شده است.

قبل از شروع آزمایش‌های مزرعه‌ای، به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک نمونه برداری انجام گرفت. نتایج مربوط به خصوصیات خاک و همچنین بیوچار استفاده شده در جدول ۲ آورده شده است.

به‌منظور حفظ پایداری خاک، جهت آماده‌سازی زمین، تنها عملیات دیسک‌زنی با تأکید بر خاکورزی حداقل در نظر گرفته شد و کلیه مراحل بعدی توسط کارگر و با بیل دستی انجام شد. با توجه به کودی بودن ماهیت تیمارها و جلوگیری از اختلاط تیمارها با هم، برای هر بلوک آزمایشی یک لوله آبیاری و پساب جداگانه در نظر گرفته شد.

بذرهای مرزه با منشاء توده‌ی گناباد از مزارع شهرستان گناباد تهیه و نیمه اردیبهشت‌ماه سال ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ در ردیف‌هایی به فاصله ۳۵ سانتی‌متر و با فاصله روی ردیف ۳۵ سانتی‌متر از یکدیگر (Mohammadpour et al., 2013) کشت شدند. مقادیر مختلف کود آلی بیوچار بسته به تیمار مورد نظر، قبل از کاشت به خاک کرت‌های مربوطه اضافه گردید. برای اعمال خاکی گوگرد، میزان ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار (Shahrusvand et al., 2019) گوگرد به خاک کرت‌های مربوطه افزوده شد. اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت به‌روش نشتی انجام شد و آبیاری‌های بعدی به فاصله هر هفت روز یک‌بار اعمال گردید. محلول‌پاشی نانوگوگرد طی دو مرحله و در مرحله چهار تا شش برگی و مرحله قبل از گل‌دهی انجام شد. برای رسیدن به تراکم مطلوب (هشت بوته در مترمربع) (Mohammadpour et al., 2013)، پس از رسیدن گیاه به مرحله چهار برگی، عملیات تنک انجام گرفت. به‌منظور کنترل علف‌های هرز، سه نوبت وجین دستی به‌ترتیب ۳۰، ۴۵ و ۶۰ روز پس از کاشت انجام شد. برای آماده‌سازی زمین و در طول دوره رشد، هیچ‌گونه علف‌کش، آفت‌کش و قارچ‌کش شیمیایی

1- Lamiaceae

استفاده نشد.

در هر دو سال زراعی، در مرحله ۵۰ درصد گل‌دهی، تعداد پنج بوته از هر کرت آزمایشی (سطح ۰/۶۲۵ مترمربع) به‌طور تصادفی انتخاب و در یک چین صفاتی نظیر تعداد بذر در بوته و وزن سرشاخه گلدار اندازه‌گیری شد. در پایان فصل رشد (شهریورماه هر سال زراعی) و با زرد شدن بوته‌ها، به‌منظور تعیین عملکرد بذر و بیولوژیک، پس از حذف اثر حاشیه‌ای، بوته‌های کل کرت‌های آزمایشی در قالب یک چین برداشت و وزن بذر و کل اندام هوایی آن‌ها اندازه‌گیری شد. شاخص برداشت از نسبت عملکرد بذر به عملکرد بیولوژیک ضرب در صد به‌دست آمد. لازم به ذکر است که در پایان برداشت (در قالب یک چین)، مقدار ۱۰۰ گرم از بوته‌های هر کرت آزمایشی برای تعیین ویژگی‌های کیفی (درصد اسانس، میزان فنل کل، فلاونوئید کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی) به آزمایشگاه ارسال شد. به‌منظور حفظ کمیت و کیفیت مواد مؤثره گیاه، نمونه‌های برداشت شده در سایه و در درجه حرارت محیط خشک شدند و سپس در آزمایشگاه توسط دستگاه سوکسله عصاره‌گیری (عصاره متانولی) شد. به‌منظور تعیین محتوای ترکیبات فنولی از روش فولین سیوکیوکالتیو استفاده شد (Ordone, 2008). محتوای فلاونوئید کل با استفاده از روش رنگ‌سنجی تعیین گردید (Chang, 2002). میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی با استفاده از روش به دام‌اندازی رادیکال دی‌فنیل پیکریل هیدرازیل تعیین شد (Shimada et al., 1992).

به‌منظور تجزیه واریانس و تحلیل آماری داده‌های آزمایش از نرم افزار SAS 9.1 استفاده شد. مقایسه کلیه میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد و توسط آزمون چنددامنه‌ای دانکن انجام گردید.

نتایج و بحث

عملکرد و اجزای عملکرد

تعداد بذر در مترمربع و وزن سرشاخه گلدار به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثرات ساده و متقابل مقادیر مختلف بیوچار و تیمارهای تغذیه‌ای قرار گرفت (جدول ۳). بر اساس نتایج اثرات متقابل بیوچار و تیمارهای تغذیه‌ای، بیشترین و کمترین تعداد بذر در مترمربع و وزن سرشاخه گلدار به‌ترتیب در تیمارهای مصرف ۲۰ تن در هکتار بیوچار و محلول‌پاشی نانوگوگرد (به‌ترتیب با ۲۷۷۷۷ بذر در مترمربع و ۲۵/۶۷ گرم سرشاخه گلدار) و عدم‌کاربرد بیوچار و شاهد (به‌ترتیب با ۸۰۲۴ بذر در مترمربع و ۶/۲۴ گرم سرشاخه گلدار) به‌دست آمد (جدول ۴). در کلیه مقادیر بیوچار مصرفی، کاربرد خاکی گوگرد معمولی و محلول‌پاشی نانوگوگرد منجر به افزایش تعداد بذر در مترمربع نسبت به شاهد شدند، به‌عنوان مثال، در شرایط مصرف ۱۰ تن در هکتار بیوچار، هر یک از تیمارهای کاربرد خاکی گوگرد و محلول‌پاشی نانوگوگرد به‌ترتیب افزایش ۹ و ۱۷ درصدی تعداد بذر در مترمربع در مقایسه با شاهد را در پی داشتند (جدول ۴).

جدول ۱- اطلاعات هواشناسی منطقه مورد پژوهش

Table 1- Meteorological information of research area

	سال زراعی ۱۴۰۰- ۱۳۹۹ Cropping year of 2020-2021						سال زراعی ۱۴۰۱- ۱۴۰۰ Cropping year of 2021-2022					
	فروردین April	اردیبهشت May	خرداد June	تیر July	مرداد August	شهریور September	فروردین April	اردیبهشت May	خرداد June	تیر July	مرداد August	شهریور September
بارندگی Rainfall (mm)	0	49.5	0.5	0.5	0	0	1.1	22.7	0	0	0	0
متوسط دما ماهیانه Mean temperature in month (°C)	19.2	23.5	30.5	30.9	29.7	26.8	19.1	24	27.1	23.6	29.5	24.5
حداکثر دمای ماهیانه Maximum temperature in month (°C)	26.4	36.5	42.4	42.8	39.7	38.8	34.1	36.3	40.9	42.2	42.1	37
حداقل دمای ماهیانه Minimum temperature in month (°C)	3.3	13	18.9	17.2	16.7	15.4	3	11.4	13.6	19.7	16.6	13.6
میزان تبخیر و تعرق Evaporation and transpiration (mm)	259.4	282.1	460.3	434.2	404.2	348.1	233.2	313.2	409.6	479.3	429.1	327.3

جدول ۲- خصوصیات عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک محل آزمایش و بیوچار مورد استفاده

Table 2- Soil characteristics (depth of 0 to 30 cm) of experimental farm and used biochar

خصوصیات بیوچار مورد استفاده Characteristics of used biochar		خاک Soil	
شاخص واکنش pH	7.7		
هدایت الکتریکی EC (dS.m^{-1})	1.20	بافت Texture	لومی-شنی Loamy-sandy
ظرفیت تبادل کاتیونی CEC (cmol.kg^{-1})	19.5		
رطوبت Moisture (%)	<1		
نیتروژن N (%)	0.41		
فسفر P (mg.kg^{-1})	5380	پتاسیم K (mg.kg^{-1})	103
پتاسیم K (mg.kg^{-1})	2360		
آهن Fe (mg.kg^{-1})	230		
روی Zn (mg.kg^{-1})	580	فسفر P (mg.kg^{-1})	8
منیزیم Mg (mg.kg^{-1})	210		
کلسیم Ca (mg.kg^{-1})	4300	نیتروژن N (%)	0.019
منگنز Mn (mg.kg^{-1})	106		
گوگرد S (mg.kg^{-1})	2670	کربن آلی Organic C (%)	0.19
سدیم Na (mg.kg^{-1})	4.7		
کربن C (%)	54	شاخص واکنش pH	8.2
هیدروژن H (%)	1.98		
اکسیژن O (%)	21.43		
ثبات Stability (°c)	540	هدایت الکتریکی EC (dS.m^{-1})	4.3
ظرفیت جذب سدیم Na-SC (mg.g^{-1})	38		

نتایج اثرات متقابل مقادیر مختلف بیوچار و سال زراعی حاکی از آن بود که در هر دو سال زراعی مورد مطالعه، کلیه مقادیر مصرفی بیوچار سبب افزایش معنی‌دار تعداد بذر در مترمربع نسبت به شاهد شدند، به این ترتیب که هر یک از سطوح ۵، ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار بیوچار، تعداد بذر در مترمربع را به‌ترتیب ۳۶، ۵۴ و ۶۳ درصد در سال زراعی اول و به‌ترتیب ۳۶، ۵۲ و ۶۳ درصد در سال زراعی دوم نسبت به شاهد افزایش دادند (جدول ۵). همان‌طور که در جدول اثرات متقابل سه‌گانه مقادیر مختلف بیوچار، تیمارهای تغذیه‌ای و سال زراعی مشاهده می‌شود، بیشترین تعداد بذر در مترمربع، زمانی به‌دست آمد که در هر دو سال زراعی مورد مطالعه، به‌طور همزمان از

۲۰ تن در هکتار بیوچار و محلول‌پاشی نانوگوگرد (به‌ترتیب با ۲۸۵۷۹ و ۲۶۹۷۶ بذر در مترمربع در سال‌های زراعی اول و دوم) استفاده شد و در سال زراعی اول، کاربرد خاکی گوگرد معمولی نیز از این نظر تفاوت معنی‌داری با تیمارهای مذکور نداشت و مقدار قابل‌توجهی بذر در مترمربع (۲۷۱۱۷ بذر در مترمربع) تولید کرد (جدول ۶). اکثر ترکیب‌های مختلف مقادیر بیوچار و تیمارهای تغذیه‌ای دارای اثر مثبت بر تعداد بذر در مترمربع بود، ولی بیشترین تأثیرگذاری این نهاده‌های بوم‌سازگار بر تعداد بذر در مترمربع، زمانی حاصل شد که به‌طور همزمان از ۲۰ تن در هکتار بیوچار و محلول‌پاشی نانوگوگرد استفاده گردید (جدول ۶).

اثرات ساده و متقابل مقادیر مختلف بیوچار و تیمارهای تغذیه‌ای و سال زراعی بر عملکرد بذر، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت معنی‌دار بود (جدول ۳). کاربرد همزمان ۲۰ تن در هکتار بیوچار و محلول‌پاشی نانوگوگرد منجر به تولید بیشترین عملکرد بذر (۱۰/۴۴ گرم در مترمربع) و عملکرد بیولوژیک (۴۶/۴۸ گرم در مترمربع) نسبت به سایر تیمارها شد (جدول ۴). در شرایط کاربرد ۲۰ تن در هکتار بیوچار، هر یک از تیمارهای کاربرد خاکی گوگرد و محلول‌پاشی نانوگوگرد به‌ترتیب افزایش هفت و چهار درصدی شاخص برداشت نسبت به شاهد را سبب شدند (جدول ۴). محلول‌پاشی نانوگوگرد در سطوح ۵ و ۱۰ تن در هکتار بیوچار نیز به‌ترتیب افزایش پنج و هفت درصدی شاخص برداشت نسبت به شاهد را در پی داشت (جدول ۴). در کلیه مقادیر مصرفی بیوچار، عملکرد بذر و بیولوژیک در شرایط کاربرد خاکی گوگرد معمولی و محلول‌پاشی نانوگوگرد بیشتر از شاهد بود، به‌عنوان مثال در شرایط مصرف ۱۰ تن در هکتار بیوچار، کاربرد خاکی گوگرد معمولی و محلول‌پاشی نانوگوگرد عملکرد بذر را به‌ترتیب ۱۱ و ۲۲ درصد و عملکرد بیولوژیک را به‌ترتیب ۱۰ و ۱۶ درصد نسبت به شاهد افزایش دادند (جدول ۴). در سال زراعی اول، اثرات مثبت محلول‌پاشی نانوگوگرد بر عملکرد بذر زمانی بیشتر بروز یافت که همزمان با کاربرد ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار بیوچار مورد استفاده قرار گرفت، به‌طوری‌که محلول‌پاشی نانوگوگرد در شرایط مصرف ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار بیوچار عملکرد بذر را به‌ترتیب ۳۲ و ۴۹ درصد در مقایسه با محلول‌پاشی این نهاده در بستر کاشت ۵ تن در هکتار بیوچار افزایش داد (جدول ۴). در سال زراعی دوم، در کلیه سطوح بیوچار مورد مطالعه، کاربرد گوگرد معمولی و محلول‌پاشی نانوگوگرد منجر به افزایش معنی‌دار عملکرد بذر نسبت به شاهد شد، به‌عنوان مثال محلول‌پاشی نانوگوگرد در بستر کاشت ۱۰ تن در هکتار بیوچار، افزایش ۲۲ درصدی عملکرد بذر نسبت به شاهد را سبب شد (جدول ۴). نتایج اثرات متقابل مقادیر مختلف بیوچار و سال زراعی نشان داد که در هر دو سال زراعی مورد مطالعه با افزایش مقادیر مصرفی بیوچار، عملکرد بذر و بیولوژیک افزایش یافت، به این ترتیب که با مصرف هر یک از مقادیر ۵، ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار بیوچار عملکرد بذر به‌ترتیب ۴۳، ۶۲ و ۷۲ درصد در سال زراعی اول و به‌ترتیب ۴۳، ۶۱ و ۷۲ درصد در سال زراعی دوم و عملکرد بیولوژیک به‌ترتیب ۴۴، ۵۹ و ۶۵ درصد در سال زراعی اول و به‌ترتیب ۴۸، ۶۰ و ۶۶ درصد در سال زراعی دوم در مقایسه با شاهد افزایش پیدا کردند (جدول ۵). محلول‌پاشی نانوگوگرد در شرایط کاربرد ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار بیوچار، شاخص برداشت را به نسبت محلول‌پاشی این نهاده در بستر کاشت ۵ تن در هکتار بیوچار بیشتر افزایش داد، به این ترتیب که میزان شاخص برداشت در تیمارهای کاربرد همزمان ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار بیوچار و محلول‌پاشی نانوگوگرد به‌ترتیب ۹ و ۱۹ درصد بیشتر از مقدار این صفت در تیمار کاربرد همزمان ۵ تن در هکتار بیوچار و محلول‌پاشی نانوگوگرد بود (جدول ۴). در هر دو سال زراعی مورد مطالعه، بیشترین شاخص برداشت در شرایط کاربرد ۲۰ تن در هکتار بیوچار (به‌ترتیب با ۲۲/۷۱ و ۲۱/۹۸ درصد شاخص برداشت در سال زراعی اول و دوم) حاصل شد (جدول ۵). نتایج اثرات متقابل سه‌گانه مقادیر مختلف بیوچار، تیمارهای تغذیه‌ای و سال زراعی نشان داد که بیشترین عملکرد بذر (۱۰/۷۴ گرم در مترمربع) و عملکرد بیولوژیک (۴۶/۹۱ گرم در مترمربع) زمانی به‌دست آمد که در سال زراعی اول به‌طور همزمان ۲۰ تن در هکتار بیوچار و محلول‌پاشی نانوگوگرد مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۶). در سال زراعی دوم، نتایج مقایسه مقادیر مختلف بیوچار و تیمارهای تغذیه‌ای خاکی از آن بود که هر دو کاربرد خاکی گوگرد معمولی و محلول‌پاشی نانوگوگرد در مقایسه با شاهد و کلیه مقادیر مصرفی بیوچار نسبت به عدم‌کاربرد این نهاده عملکرد بذر و عملکرد بیولوژیک بیشتری تولید کردند (جدول ۶). بیشترین شاخص برداشت در سال زراعی اول و دوم متعلق به تیمارهای مصرف ۲۰ تن در هکتار بیوچار و کاربرد خاکی گوگرد معمولی و همچنین محلول‌پاشی نانوگوگرد بود (جدول ۶).

جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) برخی خصوصیات کمّی و کیفی مرزه تحت‌تأثیر مقادیر مختلف بیوچار، کاربرد خاکی گوگرد معمولی و محلول‌پاشی نانوگوگرد

Table 3- Analysis of variance (mean of squares) of some quantitative and qualitative characteristics of savory affected by different amounts of biochar, soil application of common sulfur and spraying of nano-sulfur

منبع تغییرات S.O.V.	درجه آزادی df	تعداد بذر در مترمربع Seed number per m^2	وزن سرشاخه گلدار Flowering shoot weight	عملکرد بذر Seed yield	عملکرد بیولوژیک Biological yield	شاخص برداشت Harvest index	اسانس Essential oil	فنل کل Total phenol	فلاونوئید کل Total flavonoid	فعالیت آنتی‌اکسیدانی Antioxidant activity
سال Year (Y)	1	21211756**	1.62**	2.39**	6.55**	9.56**	0.01**	1.75**	120.12**	645.42**
خطای یک First error	4	15361265	15.41	0.54	9.30	1.18	0.13	0.97	55.04	56.09
بیوچار Biochar (B)	3	904013543**	705.15**	158.21**	2618.16**	102.66**	0.19**	39.07**	7018.82**	276.94**
B × Y	3	1250293**	0.07ns	0.18**	1.25*	0.98*	0.0001ns	0.02ns	1.05ns	0.001ns
تیمار تغذیه‌ای Nutritional treatment (N)	2	77146966**	58.82**	14.29**	159.78**	32.58**	0.01**	2.06**	866.66**	37.08**
خطای دو Second error	12	2364	0.14	0.0002	0.44	0.28	0.0008	0.01	2.96	1.24
B × N	6	952852**	7.47**	0.13**	7.96**	5.94**	0.01**	0.50**	125.59**	18.44**
N × Y	2	286882**	0.04ns	0.02**	1.28ns	1.004*	0.00004ns	0.04*	0.16ns	0.001ns
B × N × Y	6	1454025**	0.07ns	0.02**	1.12*	1.37**	0.00003ns	0.01ns	4.31*	0.001ns
خطای کل Total error	32	307	0.15	0.0003	0.44	0.22	0.00006	0.01	1.50	0.19
درصد ضریب تغییرات CV (%)	-	0.09	2.67	0.31	2.20	2.48	0.41	1.09	1.35	0.72

**، * و ns: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد و عدم‌معنی‌دار

**, * and ns: are significant at the 0.01 and 0.05 of probability level and non-significant, respectively.

جدول ٤- مقایسه میانگین اثرات متقابل مقادیر مختلف بیوچار، کاربرد خاکی گوگرد معمولی و محلول‌پاشی نانوگوگرد بر برخی خصوصیات کمّی و کیفی مرزه

Table 4- Mean comparison of interaction effects of different amounts of biochar, soil application of common sulfur and spraying of nano-sulfur on some quantitative and qualitative characteristics of savory

	تعداد بذر Seed number (m^{-2})	وزن سرشاخه گلدار Flowering shoot weight (g.m^{-2})	عملکرد بذر Seed yield (g.m^{-2})	عملکرد بیولوژیک Biological yield (g.m^{-2})	شاخص برداشت Harvest index	اسانس Essential oil (%)	فنل کل Total phenol (mg.g^{-1} fresh weight)	فلاونوئید کل Total flavonoid (mg.g^{-1} fresh weight)	فعالیت آنتی‌اکسیدانی Antioxidant activity (%)
عدم کاربرد بیوچار Non-application of biochar									
گوگرد معمولی Common sulfur	9534^{k*}	7.12^{h}	2.57^{k}	15.24^{i}	16.89^{e}	1.86^{c}	12.10^{b}	119.17^{a}	69.32^{a}
نانوگوگرد Nano-sulfur	11539^{j}	8.66^{g}	3.30^{j}	16.06^{i}	20.54^{c}	1.93^{bc}	12.45^{ab}	109.50^{c}	47.46^{ab}
شاهد Control	8024^{l}	6.24^{h}	2.11^{l}	13.22^{j}	15.98^{ef}	1.88^{c}	12.71^{a}	112.83^{b}	65.61^{a-c}
۵ تن در هکتار بیوچار 5 t.ha^{-1} biochar									
گوگرد معمولی Common sulfur	15304^{h}	13.36^{f}	4.66^{h}	28.08^{g}	16.61^{ef}	1.98^{bc}	11.36^{c}	100.17^{d}	61.03^{c-e}
نانوگوگرد Nano-sulfur	16884^{g}	13.52^{f}	5.34^{g}	29.64^{f}	18.18^{d}	1.87^{c}	11.52^{c}	85.83^{f}	58.45^{e-g}
شاهد Control	13199^{i}	12.44^{f}	3.89^{i}	24.56^{h}	15.85^{f}	2.03^{ab}	11.46^{c}	99.16d^{e}	63.70^{b-d}
۱۰ تن در هکتار بیوچار 10 t.ha^{-1} biochar									
گوگرد معمولی Common sulfur	20605^{e}	16.72^{d}	6.89^{e}	36.84^{d}	18.71^{d}	2.14^{a}	10.48^{d}	96.50^{e}	57.26^{e-h}
نانوگوگرد Nano-sulfur	22595^{d}	18.42^{c}	7.86^{d}	39.38^{c}	19.96^{c}	2.12^{a}	11.43^{c}	76.33^{g}	56.07^{f-h}
شاهد Control	18848^{f}	15.36^{e}	6.15^{f}	33.08^{e}	18.58^{d}	2.11^{a}	10.61^{d}	85.00^{f}	59.57^{d-f}
۲۰ تن در هکتار بیوچار 20 t.ha^{-1} biochar									
گوگرد معمولی Common sulfur	26279^{b}	21.03^{b}	9.51^{b}	41.26^{b}	23.05^{a}	1.89^{c}	8.60^{f}	65.33^{i}	54.11^{gh}
نانوگوگرد Nano-sulfur	27777^{a}	25.67^{a}	10.44^{a}	46.48^{a}	22.46^{a}	1.89^{c}	9.48^{e}	62.83^{i}	52.85^{h}
شاهد Control	24381^{c}	19.92^{b}	8.63^{c}	40.08^{bc}	21.53^{b}	1.96^{bc}	8.70^{f}	70.83^{h}	55.61^{f-h}

* در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، تفاوت معنی‌داری ندارند.

* In each column, means followed by the same letters are not significantly different ($p \leq 0.05$).

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات متقابل مقادیر مختلف بیوچار و سال زراعی بر برخی خصوصیات کمّی مرزه
Table 5- Mean comparison of interaction effects of different amounts of biochar and cropping year on some quantitative characteristics of savory

	تعداد بذر Seed number (m^{-2})	عملکرد بذر Seed yield ($g.m^{-2}$)	عملکرد بیولوژیک Biological yield ($g.m^{-2}$)	شاخص برداشت Harvest index
		سال زراعی اول First cropping year		
عدم کاربرد بیوچار Non-application of biochar	9958[d*]	2.73[d]	15.24[d]	17.83[c]
۵ تن در هکتار بیوچار 5 $t.ha^{-1}$ biochar	15514[c]	4.75[c]	27.33[c]	17.40[cd]
۱۰ تن در هکتار بیوچار 10 $t.ha^{-1}$ biochar	21499[b]	7.24[b]	36.87[b]	19.63[b]
۲۰ تن در هکتار بیوچار 20 $t.ha^{-1}$ biochar	26857[a]	9.78[a]	43.06[a]	22.71[a]
		سال زراعی دوم Second cropping year		
عدم کاربرد بیوچار Non-application of biochar	9440[d]	2.59[d]	14.43[d]	17.77[c]
۵ تن در هکتار بیوچار 5 $t.ha^{-1}$ biochar	14744[c]	4.51[c]	27.52[c]	16.37[d]
۱۰ تن در هکتار بیوچار 10 $t.ha^{-1}$ biochar	19867[b]	6.69[b]	36.00[b]	18.54[bc]
۲۰ تن در هکتار بیوچار 20 $t.ha^{-1}$ biochar	25435[a]	9.26[a]	42.15[a]	21.98[a]

* در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، تفاوت معنی‌داری ندارند.
* In each column, means followed by the same letters are not significantly different ($p \leq 0.05$).

همبستگی مثبت و معنی‌دار عملکرد بذر و عملکرد بیولوژیک با صفاتی همچون تعداد بذر در بوته (به‌ترتیب با ضریب همبستگی **۰/۹۹ و **۰/۹۷ =r با عملکرد بذر و عملکرد بیولوژیک) و وزن سرشاخه گلدار (به‌ترتیب با ضریب همبستگی **۰/۹۷ و **۰/۹۷ =r با عملکرد بذر و عملکرد بیولوژیک) (جدول ۷)، احتمالاً سبب شده نهاده‌های اکولوژیک زغال زیستی و تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی مؤثر بر این صفات (جدول ۴، ۵ و ۶)، در بهبود عملکرد بذر و عملکرد بیولوژیک نیز نقش ایفا کنند و این موضوع از لحاظ مدیریتی نشان‌دهنده اهمیت نهاده‌های مؤثر بر اجزاء عملکرد و تأثیر آن‌ها و عملکرد اقتصادی مرزه است.

به نظر می‌رسد که کود آلی بیوچار به‌دلیل تخلخل بالا و سطح ویژه زیاد احتمالاً از طریق افزایش ظرفیت نگهداری آب (Al Baquy et al., 2023) و کاهش چگالی ظاهری خاک (Javeed et al., 2023) سبب شده است تا آب و مواد غذایی بیشتری در اختیار ریشه قرار گیرد و در نتیجه، عملکرد و اجزاء عملکرد در شرایط استفاده از این نهاده بهبود یافته است. تأثیر کاربرد بیوچار و سطوح مختلف مدیریت آبیاری بر عملکرد و اجزاء عملکرد گیاه دارویی زنیان (*Trachyspermum ammi* L.) نشان داد که بیشترین مقدار ارتفاع بوته، وزن تر و خشک بوته، وزن ۱۰۰ دانه، عملکرد دانه و کارآیی مصرف آب در شرایط کاربرد ۴۵ تن در هکتار بیوچار به‌دست آمد (Khasheisiuki, et al., 2019). در پژوهشی دیگر، بیشترین عملکرد بیولوژیک و میزان کلروفیل a گیاه دارویی سرخارگل در شرایط تنش خشکی در تیمار استفاده از کود آلی بیوچار مشاهده شد (Emami, 2022). عملکرد دانه، وزن ۱۰۰ دانه و تعداد شاخه اصلی و فرعی گیاه دارویی شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum* L.) تحت تأثیر کاربرد بیوچار افزایش یافت (Bitarafan et al., 2019). کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوچار در مزرعه نعنافلفلی (*Mentha piperita* L.) منجر به تولید بیشترین وزن تر برگ، وزن ساقه و وزن تر کل شد و میزان محتوای نیتروژن را نسبت به شاهد افزایش داد و کاربرد همزمان بیوچار با میکوریزا و ورمی‌کمپوست تولید بیشترین میزان فسفر را در پی داشت (Zaefarian et al., 2019).

جدول ٦- مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه مقادیر مختلف بیوچار، کاربرد خاکی گوگرد معمولی و محلول‌پاشی نانوگوگرد و سال زراعی بر برخی خصوصیات کمّی و کیفی مرزه

Table 6- Mean comparison of triple interaction effects of different amounts of biochar, soil application of common sulfur and spraying of nano-sulfur and cropping year on some quantitative and qualitative of savory

		تعداد بذر Seed number (m^{-2})	عملکرد بذر Seed yield ($g.m^{-2}$)	عملکرد بیولوژیک Biological yield ($g.m^{-2}$)	شاخص برداشت Harvest index (%)	فلاونوئید کل Total flavonoid ($mg.g^{-1}$ fresh weight)	تعداد بذر Seed number (m^{-2})	عملکرد بذر Seed yield ($g.m^{-2}$)	عملکرد بیولوژیک Biological yield ($g.m^{-2}$)	شاخص برداشت Harvest index (%)	فلاونوئید کل Total flavonoid ($mg.g^{-1}$ fresh weight)
		سال زراعی اول First cropping year					سال زراعی دوم Second cropping year				
عدم بیوچار Non biochar	گوگرد معمولی Common sulfur	9869^{mn*}	2.67^{n}	15.76^{k}	16.95^{jk}	118.33^{a}	9200no	2.48^{no}	14.72^{kl}	16.83^{jk}	120.00^{a}
۵ تن در هکتار بیوچار 5 $t.ha^{-1}$ biochar		15496^{i}	4.72^{k}	28.56^{i}	16.54^{kl}	99.33^{de}	15112^{ij}	4.60^{k}	27.60^{i}	16.68^{kl}	101.00^{d}
۱۰ تن در هکتار بیوچار 10 $t.ha^{-1}$ biochar		21451^{ef}	7.17^{g}	37.36^{ef}	19.21^{h}	95.00^{e}	19760^{fg}	6.61^{h}	36.32^{f}	18.22^{i}	98.00^{de}
۲۰ تن در هکتار بیوچار 20 $t.ha^{-1}$ biochar		27117^{ab}	9.81^{b}	41.64^{b}	23.57^{a}	63.66^{kl}	25440^{bc}	9.20^{c}	40.87^{bc}	22.53^{bc}	67.00^{jk}
عدم بیوچار Non biochar	نانوگوگرد Nano-sulfur	11797^{k-m}	3.37^{m}	16.37^{k}	20.63^{ef}	108.00^{c}	11280^{lm}	3.22^{m}	15.76^{k}	20.45^{ef}	111.00^{bc}
۵ تن در هکتار بیوچار 5 $t.ha^{-1}$ biochar		17608^{h}	5.57^{i}	28.56^{i}	19.70^{f-h}	84.66^{f}	16160^{hi}	5.12^{j}	30.72^{h}	16.66^{kl}	87.00^{f}
۱۰ تن در هکتار بیوچار 10 $t.ha^{-1}$ biochar		23269de	8.10^{e}	39.89^{b-d}	20.31^{fg}	74.66^{gh}	21920^{e}	7.62^{f}	38.88^{de}	19.61^{f-h}	78.00^{g}
۲۰ تن در هکتار بیوچار 20 $t.ha^{-1}$ biochar		28579^{a}	10.74^{a}	46.91^{a}	22.90^{ab}	61.66^{l}	26976^{ab}	10.14^{b}	46.06^{a}	22.01^{b-d}	64.00^{kl}
عدم بیوچار Non biochar	شاهد Control	8208no	2.16^{op}	13.61^{lm}	15.93^{kl}	111.67^{bc}	7840^{o}	2.06^{p}	12.82^{m}	16.02^{kl}	114.00^{b}
۵ تن در هکتار بیوچار 5 $t.ha^{-1}$ biochar		13437^{jk}	3.96^{l}	24.88^{j}	15.95^{kl}	96.33^{e}	12960^{kl}	3.82^{l}	24.24^{j}	15.75^{l}	102.00^{d}
۱۰ تن در هکتار بیوچار 10 $t.ha^{-1}$ biochar		19776^{fg}	6.46^{h}	33.36^{g}	19.36^{gh}	85.00^{f}	17920^{gh}	5.84^{i}	32.80^{g}	17.80^{ij}	85.00^{f}
۲۰ تن در هکتار بیوچار 20 $t.ha^{-1}$ biochar		24875^{cd}	8.80^{d}	40.64^{b-d}	21.66^{cd}	69.66^{ij}	23888^{cd}	8.45^{d}	39.52^{cd}	21.39^{de}	72.00^{hi}

* در هر صفت، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، تفاوت معنی‌داری ندارند.

* In each trait, means followed by the same letters are not significantly different ($p \leq 0.05$).

جدول ۷- ضرایب همبستگی صفات مورد مطالعه در مرزه تحت تأثیر مقادیر مختلف بیوچار و کاربرد خاکی گوگرد معمولی و محلول‌پاشی نانوگوگرد

Table 7- Correlation coefficients of studied traits in savory affected by different amounts of biochar and soil application of common sulfur and spraying of nano-sulfur

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
تعداد بذر در بوته (۱) Seed number per plant (1)	1								
وزن سرشاخه گلدار (۲) Flowering shoot weight (2)	0.98**	1							
عملکرد بذر (۳) Seed yield (3)	0.99**	0.97**	1						
عملکرد بیولوژیک (۴) Biological yield (4)	0.97**	0.97**	0.97**	1					
شاخص برداشت (۵) Harvest index (5)	0.79**	0.73**	0.81**	0.66**	1				
اسانس (۶) Essential oil (6)	0.25*	0.26*	0.17	0.28*	-0.02	1			
فنل کل (۷) Total phenol (7)	-0.84**	-0.81**	-0.86**	-0.82**	-0.70**	0.07	1		
فلاونوئید کل (۸) Total flavonoid (8)	-0.92**	-0.91**	-0.94**	-0.92**	-0.74**	-0.01	0.84**	1	
فعالیت آنتی‌اکسیدانی (۹) Antioxidant activity (9)	-0.78**	-0.74**	-0.79**	-0.79**	-0.58**	0.07	0.76**	0.83**	1

** و *: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد

** and *: are significant at the 0.01 and 0.05 of probability level, respectively.

در پژوهشی دیگر، اگر چه بین سطوح مختلف بیوچار از لحاظ نقش این کود در تقلیل اثرات منفی تنش خشکی در برخی صفات گیاه دارویی گل گاوزبان اروپایی (*Borago officinalis* L.) تفاوت معنی‌داری وجود نداشت، ولی به‌طور کلی کاربرد بیوچار در بهبود اکثر شاخص‌های فیزیولوژیکی و کیفی این گیاه مؤثر بود (Taghizadehtabari et al., 2021). به نظر می‌رسد که استفاده از تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی احتمالاً به‌دلیل نقش گوگرد در تشکیل بسیاری از اسید آمینه‌های ضروری و ساخت پروتئین‌ها (Al-Obeidi & Al-Obeidi, 2023) و همچنین ضرورت وجود آن برای ساخت کلروفیل و بسیاری از ویتامین‌ها (Narayan et al., 2022)، توانسته است اثرات مثبتی بر عملکرد و اجزاء عملکرد مرزه بر جای گذارد. همچنین ثابت شده است که استفاده از گوگرد به‌شکل نانوکود، برای رشد گیاه و کیفیت محصولات کشاورزی بسیار مفید است و در عین حال، از اثرات سمی آفت‌کش‌ها و هورمون‌ها و افزودنی‌های رشد جلوگیری می‌کند (Shankar et al., 2020) و نکته حائز اهمیت اینکه نانوکود گوگرد برخلاف بسیاری از فلزات و نانوذرات دیگر، موادی بوم‌سازگار و ایمن و غیرسمی برای محیطزیست هستند (Ragab & Saad-Allah, 2020). نانوکود گوگرد به‌دلیل ویژگی‌های خاص اندازه ذرات کوانتومی و سطح ویژه بالا، نسبت به گوگرد معمولی مزیت‌های بیشتری دارد (Turganbay et al., 2019). در یک پژوهش، کاربرد ۲۰ کیلوگرم در هکتار گوگرد منجر به افزایش قابل توجه ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی، وزن ۱۰۰ دانه و عملکرد بذر ماش (*Vigna radiate* L.) در مقایسه با شاهد شد (Murshed et al., 2021). در پژوهشی دیگر، بیشترین ارتفاع بوته، قطر ساقه، تعداد گل در بوته و عملکرد گل گیاه دارویی آرنیکای چامیسو (*Arnica chamissonis* Less. ssp. *foliosa*) در تیمار ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود گوگردی بنتونیتی به‌دست آمد (Asadi et al., 2019). در یک پژوهش، الموسوی و جمیل (Almousswi & Jameel, 2022) گزارش کردند که استفاده از گوگرد معمولی و محلول‌پاشی نانوگوگرد کلیه صفات مورد مطالعه (نظیر ارتفاع بوته، سطح برگ و وزن خشک) در گیاه دارویی تره کوهی را نسبت به شاهد افزایش داد که البته از این نظر کاربرد نانوگوگرد نسبت به گوگرد معمولی نقش مؤثرتری در بهبود خصوصیات کمّی و کیفی گیاه ایفا کرد. بهبود ویژگی‌های کمّی و عملکرد باقلا (*Vicia faba* L.) نیز تحت تأثیر کودهای گوگردی

گزارش شده است (Hameed & Hasan, 2022).

خصوصیات فیتوشیمیایی

اثرات مقادیر مختلف بیوچار و تیمار تغذیه‌ای و برهم‌کنش آن‌ها به‌طور معنی‌داری بر میزان اسانس تأثیر داشت (جدول ۳). بیشترین میزان اسانس (۲/۱۲ درصد) در تیمار ۱۰ تن در هکتار بیوچار به‌دست آمد (جدول ۸). کاربرد ۵ و ۲۰ تن در هکتار بیوچار نیز به‌ترتیب افزایش چهار و یک درصدی میزان اسانس را نسبت به شاهد سبب شدند (جدول ۸). نتایج آزمایش نشان داد که با افزایش مقادیر مصرفی بیوچار از میزان فنل کل، فلاونوئید کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی کاسته شد، به‌طوری‌که هر یک از سطوح ۵، ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار بیوچار میزان فنل کل را به‌ترتیب ۸، ۵ و ۲۸ درصد، میزان فلاونوئید کل را به‌ترتیب ۱۶، ۲۵ و ۴۲ درصد و میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی را به‌ترتیب ۹، ۱۵ و ۲۰ درصد در مقایسه با شاهد کاهش دادند. بیشترین میزان فنل کل (۱۱/۲۲ درصد) در تیمار محلول‌پاشی نانوگوگرد و بیشترین میزان فلاونوئید کل (۹۵/۲۹ درصد) در تیمار کاربرد خاکی گوگرد معمولی مشاهده شد (جدول ۸). اعمال تیمار تغذیه‌ای گوگردی کاهش میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی را نسبت به شاهد سبب شد، به‌طوری‌که مقدار این صفت در شرایط کاربرد گوگرد معمولی و نانوگوگرد به‌ترتیب یک و چهار درصد کمتر از شاهد بود (جدول ۸). نتایج اثرات متقابل مقادیر مصرفی بیوچار و تیمارهای تغذیه‌ای نشان داد که با افزایش مقادیر بیوچار تا سطح ۱۰ تن در هکتار، اثرات مثبت گوگرد معمولی و نانوگوگرد در بهبود میزان اسانس محسوس‌تر بود، به‌طوری‌که بیشترین میزان اسانس در تیمار کاربرد همزمان ۱۰ تن در هکتار بیوچار و مصرف خاکی گوگرد معمولی به‌دست آمد و افزایش بیشتر مقدار بیوچار (تا سطح ۲۰ تن در هکتار)، کاهش میزان اسانس در تیمارهای تغذیه‌ای مذکور را به همراه داشت (جدول ۴). میزان فنل کل، فلاونوئید کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی تحت تأثیر استفاده همزمان مقادیر بیوچار و تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی کاهش یافت، به‌طوری‌که بیشترین میزان این صفات زمانی حاصل شد که از هیچ مقدار زغال زیستی به‌صورت توأم با تیمارهای تغذیه‌ای استفاده نگردید (جدول ۴).

جدول ۸- مقایسه میانگین برخی ویژگی‌های فیتوشیمیایی مرزه تحت‌تأثیر مقادیر بیوچار و کاربرد خاکی گوگرد معمولی و محلول‌پاشی نانوگوگرد

Table 8- Mean comparison of some phytochemical characteristics of savory affected by amounts of biochar and soil application of common sulfur and spraying of nano-sulfur

	اسانس Essential oil (%)	فنل کل Total phenol (mg.g^{-1} fresh weight)	فلاونوئید کل Total flavonoid (mg.g^{-1} fresh weight)	فعالیت آنتی‌اکسیدانی Antioxidant activity (%)
مقادیر بیوچار Amounts of biochar (t.ha^{-1})				
0	1.89^{d*}	12.42^{a}	113.83^{a}	67.46^{a}
5	1.96^{b}	11.45^{b}	95.05^{b}	61.06^{b}
10	2.12^{a}	10.84^{c}	85.94^{c}	57.63^{c}
20	1.91^{c}	8.92^{d}	66.33^{d}	54.19^{d}
تیمار تغذیه‌ای Nutrient treatment				
گوگرد معمولی Common sulfur	1.96^{b}	10.63^{c}	95.29^{a}	60.43^{b}
نانوگوگرد Nano-sulfur	1.95^{c}	11.22^{a}	83.62^{c}	58.70^{c}
شاهد Control	1.99^{a}	10.87^{b}	91.95^{b}	61.12^{a}
سال زراعی Cropping year				
اول First	1.96^{b}	10.75^{b}	89.00^{b}	57.09^{b}
دوم Second	1.98^{a}	11.06^{a}	91.58^{a}	63.08^{a}

* در هر سال زراعی، در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، تفاوت معنی‌داری ندارند.

* In each cropping year, in each column, means followed by the same letters are not significantly different ($p \leq 0.05$).

نتایج اثرات متقابل سه‌گانه مقادیر مختلف بیوچار، تیمارهای تغذیه‌ای و سال زراعی نشان داد که در هر دو سال زراعی مورد مطالعه، بیشترین میزان فلاونوئید کل (به‌ترتیب با ۱۱۸/۳۳ و ۱۲۰ گرم بر گرم وزن تر) متعلق به تیمار عدم‌مصرف بیوچار و کاربرد خاکی گوگرد معمولی بود (جدول ۶). همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، همبستگی بین اکثر خصوصیات فیتوشیمیایی و صفات کمّی گیاه منفی بود و ازاین‌رو، با توجه به اثرگذاری مثبت مقادیر مختلف بیوچار و تیمارهای تغذیه‌ای بر عملکرد و اجزاء عملکرد مرزه، نقصان ویژگی‌های فیتوشیمیایی گیاه در شرایط استفاده از این نهاده‌ها منطقی به نظر می‌رسد.

به نظر می‌رسد که بیوچار احتمالاً از طریق افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و تأمین مواد غذایی قابل جذب (Gaudutis et al., 2023) و تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی احتمالاً به‌دلیل نقش گوگرد در ساختمان بسیاری از متابولیت‌های ثانویه گیاهی (Gohain et al., 2019) منجر به بهبود میزان اسانس مرزه شده‌اند و با توجه به اینکه ثابت شده است که میزان مواد مؤثره گیاهان دارویی عمدتاً در شرایط تنش بیشتر از شرایط عادی است، کاهش میزان فنل کل، فلاونوئید کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی تحت تأثیر نهاده‌های اکولوژیک مورد مطالعه، منطقی به نظر می‌رسد. در یک پژوهش، پس از بررسی برهم‌کنش بیوچار و سوپرجاذب بر ترکیب‌های تشکیل‌دهنده اسانس مرزه رشینگری در شرایط تنش خشکی، گزارش شد که بیشترین مقدار کارواکرول در تیمار کاربرد همزمان بیوچار و ۶۰ میلی‌گرم سوپرجاذب در شرایط تنش شدید رطوبتی به‌دست آمد (Beiranvandi et al., 2020). کاربرد بیوچار در مزرعه گیاه دارویی شوید (*Anethum graveolens* L.) در شرایطی که گیاه در معرض تنش شوری قرار داشت، افزایش مقدار لیمونن، کارون، آپیول و دیلاپیول و همچنین بهبود میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی را سبب شد (Ghassemi-Golezani & Rahimzadeh, 2022). در پژوهشی دیگر، بیشترین میزان روغن، پروتئین و عملکرد دانه کنجد در شرایط کاربرد همزمان گوگرد (۸ تن در هکتار) و کود گاوی (۲۰ تن در هکتار) به‌دست آمد (Saeidinezhad et al., 2019). کاربرد همزمان کودهای گوگردی و کودهای حاوی عناصر روی و بور، بیشترین عملکرد اقتصادی و بهترین کیفیت از نظر مقدار آلیسین در گیاه دارویی سیر (*Allium sativum* L.) را سبب شد (Zare Pak Ziaberi & Majidian, 2022). محلول‌پاشی نانوگوگرد در مزرعه آفتابگردان، منجر به تولید بیشترین ماده خشک، عملکرد دانه و میزان روغن شد و میزان گوگرد خاک را نیز به‌میزان قابل‌توجهی افزایش داد (Subramanian et al., 2022).

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، نتایج آزمایش نشان داد که مقادیر مختلف بیوچار و تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی و برهم‌کنش آن‌ها دارای اثر مثبت بر عملکرد و اجزاء عملکرد مرزه بود. در هر دو سال زراعی با افزایش مقادیر مصرفی بیوچار تعداد دانه در بوته، وزن سرشاخه گلدار، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت به‌طور معنی‌داری در مقایسه با شاهد افزایش یافت، به‌طوری‌که بیشترین مقدار صفات یاد شده در هر دو سال زراعی در تیمار ۲۰ تن در هکتار بیوچار مشاهده شد. در بین تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی، محلول‌پاشی نانوگوگرد منجر به تولید بیشترین مقدار صفات مربوط به عملکرد و اجزاء عملکرد ن‌سبت به سایر تیمارها شد که البته از این نظر کاربرد گوگرد معمولی نیز در بهبود صفات مذکور مؤثر بود. نتایج اثرات متقابل مقادیر مختلف بیوچار و تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی نشان داد که بیشترین مقدار تعداد بذر در مترمربع (۲۷۷۷۷ بذر در مترمربع)، وزن سرشاخه گلدار (۲۵/۶۷ گرم در مترمربع)، عملکرد بذر (۱۰/۴۴ گرم در مترمربع) و عملکرد بیولوژیک (۴۶/۴۸ گرم در مترمربع) متعلق به تیمار مصرف تلفیقی ۲۰ تن در هکتار بیوچار و محلول‌پاشی نانوگوگرد بود. همچنین در هر دو سال زراعی، کاربرد همزمان گوگرد معمولی یا نانوگوگرد با بیوچار و به‌ویژه مقادیر بالاتر زغال زیستی، اثرات مثبت بیشتری بر عملکرد و اجزاء عملکرد مرزه در مقایسه با کاربرد جداگانه تیمارهای تغذیه‌ای داشت. از نظر تأثیر بیوچار و تیمارهای تغذیه‌ای گوگردی و برهم‌کنش آن‌ها بر ویژگی‌های فیتوشیمیایی مرزه، نتیجه در صفات کیفی مختلف متفاوت بود، به‌عنوان مثال کاربرد همزمان ۱۰ تن در هکتار بیوچار و مصرف گوگرد معمولی منجر به تولید بیشترین میزان اسانس در هر دو سال زراعی شد، درحالی‌که در سایر صفات کیفی مورد مطالعه (میزان فنل کل، فلاونوئید کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی) استفاده تلفیقی از تیمارهای کودی دارای اثر منفی بر مقدار صفات بود. به‌طور کلی، با توجه به یافته‌های این پژوهش، به نظر می‌رسد که با مصرف تلفیقی مقادیر بهینه زغال زیستی و تیمارهای تغذیه‌ای

گوگردی به‌ویژه نانوگوگرد می‌توان عملکرد و اجـزاء عملکـرد مـرزه را بهبود بخشید و به‌منظور حفظ و افزایش کیفیت محصول تولیدی نیـاز است که از نهاده‌های بوم‌سازگار و مکمل دیگری استفاده نمود.

References

1. Al Baquy, M.A., Nkon, J.N., Alam, M., & Masud, M.M. (2023). Biochar application to soils to improve the management of irrigation water. *Sustainable Agriculture Reviews book Series*, *61*, 273-291. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26983-7_12
2. Almousswi, Z.A., & Jameel, D.A. (2022). The effect of foliar fertilization with normal and nano sulfur and the interaction between them in some vegetative characteristics, plant pigments content and dryweight of the shoot system of two varieties of leek plans *Allium ampeloprasum* L. *Iranian Journal of Ichthyology*, *9*(1), 397-405.
3. Al-Obeidi, M.M.H., & Al-Obeidi, H.S.H. (2023). Effect of organic fertilizer spraying from various sources and agricultural sulfur in the growth and harvest of garlic. Fifth International Conference for Agricultural and Environments Sciences. 1158, 042067. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1158/4/042067
4. Asadi, M., Hadian, J., Ebrahimi, S. N., & Karimzadeh, G. (2019). Effect of different levels of sulfur on growth, quality characteristics and yield of *Arnica chamissonis* Less. ssp. *foliosa*. Journal of Horticulture Science, 33(2), 219-232. (In Persian with English summary) https://doi.org/10.22067/jhorts4.v0i0.71858
5. Bakhshian, M., Naderi, M.R., Javanmard, H.R., & Bahreininejad, B. (2022). The growth of summer savory (*Satureja hortensis*) affected by fertilization and plant growth regulators in temperature stress. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *43*, 102371. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102371
6. Beiranvandi, M., Akbari, N., Ahmadi, A., Mumivand, H., & Nazarian, F. (2020). Interaction of biochar and superabsorbent on the composition of *Satureja rechingeri* Jamzad. essential oil under drought stress. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, *36*(5), 780-793. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.22092/ijmapr.2020.342067.2732
7. Bitarafan, Z., Asghari, H.R., Hasanloo, T., Gholami, A., & Moradi, F. (2019). Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) landraces response to biochar application under deficit irrigation. *Journal of Agroecology*, *11*(2), 403-415. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.22067/jag.v11i2.67531
8. Chang, Y.L. (2002). Vitamin C equivalent antioxidant capacity (VCEAC) of phenolic phytochemicals. *Journal Agricultural Food Chemistry*, *50*, 3713-3717. https://doi.org/10.1021/jf020071c
9. Deepak, B. R., Padma, M., Prabhakarand, B. N., & Vijaya, D. (2019). Effect of NPK, zinc and sulphur levels on oil yield of Japanese mint (*Mentha arvensis* L.) var. Kosi. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *8*(4), 3412-3415.
10. Eghlima, G., Mohammadi, M., Mirjalili, M.H., & Ghorbanpour, M. (2024). Exploring the potential impact of biochar amendments in promoting redox reactions, agro-morphological, and phytochemical characteristics in *Satureja khuzistanica* Jamzad Under Salt Stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *24*(1), 190-202. https://doi.org/10.1007/s42729-023-01566-z
11. Emami, T. (2022). Effect of biochar and salicylic acid on physiological traits and yield of echinacea (*Echinacea purpurea* L.) under non-stress and drought stress conditions. *Journal of Crop Science Research in Arid Regions*, *4*(1), 229-243. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.22034/CSRAR.2022.320762.1172
12. Enaime, G., Bacaoui, A., Yaacoubi, A., & Lubken, M. (2020). Biochar for wastewater treatment conversion technologies and application. *Applied Sciences*, *10*(10), 3492-3501. https://doi.org/10.3390/app10103492
13. Feizi, K., Amirinejad, A., & Ghobadi, M. (2021). The effects of biochar and salicylic acid on reducing pb-induced stress in basil crop (*Ocimum basilicum* L.). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *52*(2), 539-547. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.313282.668795
14. Gaudutis, A., Jotautiene, E., Mieldazys, R., Bivainis, V., & Jasinshas, A. (2023). Sustainable use of biochar, poultry and cattle manure for the production of organic granular fertilizers. *Agronomy*, *13*, 1426. https://doi.org/10.3390/agronomy13051426
15. Ghaderi, J., Davoodi, M.H., & Khavazi, K. (2021). Effect of elemental sulfur and *Thiobacillus* bacteria on yield and some quality characteristics of canola. *Iranian Journal of Soil Research*, *35*(3), 235-252. https://doi.org/10.22092/ijsr.2021.354082.595

16. Ghassemi-Golezani, K., & Rahimzadeh, S. (2022). The biochar-based nanocomposites influence the quantity, quality and antioxidant activity. *Scientific Reports*, *12*, 21903. https://doi.org/10.1038/s41598-022-26578-0
17. Gohain, B.P., Rose, T.J., Liu, L., Barkla, B.J., Raymond, C.A., & King, G.J. (2019). Remobilization and fate of Sulphur in mustard. *Annals of Botany*, *124*(3), 471-480. https://doi.org/10.1093/aob/mcz101
18. Hameed, D.B., & Hasan, A.E. (2022). Effect of sulfur and *Rhizobium leguminosarum* on available of some nutrients and the growth of broad bean plants. *Annals of Forest Research*, *65*(1), 4827-4834.
19. Javeed, H.M.R. Ali, M., Zamir, M.S.I., Qamar, R., Kanwal, S., Andleeb, H., Qammar, N., Jhangir, K., Elkelish, A., Mubeen, M., Sarwar, M.A., Khalid, S., Zain, M., Nawaz, F., Mubeen, Kh., Bukhari, M.A., Zakir, A., Farooq, M.A., & Masood, N. (2023). Biochar and arbuscular mycorrhizae fungi to improve soil organic matter and fertility. pp 331-354 in E. Lichfous (Ed.). Sustainable Agriculture Reviews Book Series. Springer Press. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26983-7_15
20. Katar, N. (2022). Determining of effect of different planting densities on yield and quality in summer savory (*Satureja hortensis* L.). *Journal of Biological Diversity and Conservation, 15*(1), 30-37. https://doi.org/10.46309/biodicon.2022.957099
21. KhasheiSiuki, A., Shahidi, A., Yaghoubzadeh, M., & Dastorani, M. (2019). Effect of biochar application and irrigation management on yield and yield components medicinal plant (*Trachyspermum ammi* L.). *Iranian Journal of Irrigaiton and Drainage, 13*(2), 319-328. (In Persian with English Summary). https://doi.org/20.1001.1.20087942.1398.13.2.5.3.
22. Mehdizadeh, L., Moghaddam, M., & Lakzian, A. (2019). Effect of biochar on growth characteristics and sodium to potassium ratio of summer savory under Nacl stress. *Environmental Stresses in Crop Science, 12*(2), 595-606. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.22077/escs.2019.1419.1308
23. Mohammadpour, M., Ghasemnejad, A., Lebaschy, M.H., Abbaszadeh, B., & Azadbakht, M. (2013). Effects of sowing date and plant density on morphological characteristics and yield of summer savory (*Satureja hortensis* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, *29*(3), 621-634. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.22092/ijmapr.2013.4046
24. Murshed, M.D.F., Syfullah, K., Zonayet, M.D., Bashar, M.D.A., Jahan, A., & Sayeed, K.A. (2021). Effect of nitrogen and sulfur on the growth and yield of mungbean. *Asian Journal of Plant and Soil Sciences*, *6*(1), 187-194.
25. Narayan, O.P., Kumar, P., Yadav, B., Dua, M., & Johri, A.K. (2022). Sulfur nutrition and its role in plant growth and development. *Plant Signaling and Behavior, 7*, 2030082. https://doi.org/10.1080/15592324.2022.2030082.
26. Ordone, A.A.L. (2008). Antioxidant activities of *Sechium edule* Swartz extracts. *Journal Agricultural Food Chemistry*, *97*, 452-458. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.05.024
27. Ragab, G.A., & Saad-Allah, K.M. (2020). Green synthesis of sulfur nanoparticles using *Ocimum basilicum* leaves and its prospective effect on manganese-stressed *Helianthus annuus* (L.) seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *191*, 110242. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110242.
28. Rodov, V., Vinokur, Y., Gogia, N., & Chkhikvishvili, I. (2010). Hydrophilic and lipophilic antioxidant capacities of Georgian spices for meat and their possible health implications. *Georgian Med News*, *179*, 61-6.
29. Saeidinezhad, M., Behdani, M.A., Sayyari, M.H., & Mahmoudi, S. (2019). The effect of sulfur and manure on quantitative and qualitative characteristics of sesame varieties (*Sesamum indicum* L.). *Journal of Agroecology, 11*(3), 845-857. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.22067/jag.v11i3.71128
30. Sanbongi, C., Takano, H., Osakabe, N., Sasa, N., Natsume, M., Yanagisawa, R., Inoue, K.I., Kato, Y., Osawa, T., & Yoshikawa, T. (2003). Rosmarinic acid inhibits lung injury induced by diesel exhaust particles. *Free Radical Biology and Medicine, 34*(8), 1060-1069. https://doi.org/10.1016/S0891-5849(03)00040-6
31. Shahrusvand, S., Eisvand, H.R., Firozabadi, F.N., & Feizian, M. (2019). Effect of sulphur and vermicompost application on agronomic traits of hubbit cultivar of soybean (*Glycine max* L.). *Journal of Crop Ecophysiology, 51*(3), 447-460. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.30495/jcep.2019.669715
32. Shankar, S., Jaiswal, L., & Rhim, J.W. (2020). New insight into sulfur nanoparticles: synthesis and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *51*(20), 2329-2356. https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1780880
33. Shimada, K., Fujikawa, K., Yahara, K., & Nakamura, T. (1992). Antioxidative properties of xanthin on autoxidation of soybean oil in cyclodetrin emulsion. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 40,* 945-948. https://doi.org/10.1021/jf00018a005

34. Subramanian, K.S., Rajeswari, R., Yuvaraj, M., Pradeep, D., Guna, M., & Yoganathan, G. (2022). Synthesis and characterization of nano-sulfur and its impact on growth, yield, and quality of sunflower (*Helianthus annuus* L.). Communications in Soil Science and Plant Analysis. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, 53(20),* 2700-2709. https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2072867
35. Taghizadehtabari, Z., Asghari, H., Abbasdokht, H., & Babakhanzadeh, E. (2021). Effects of biochar and salicylic acid on some characteristics of (*Borago officinalis* L.) in water deficit condition. *Journal of Plant Production, 28*(1), 93-113. (In Persian). https://doi.org/10.22069/jopp.2021.17250.2599
36. Turganbay, S., Aidarova, S.B., Turganbay, G., Tileuberdi, Y., & Chen, S.L. (2019). Synthesis and characterization of sulfur nanoparticles with WSP/surfactants mixtures. *International Journal of Biological Chemistry*, *12*, 146-152. https://doi.org/10.26577/ijbch-2019-1-i19.
37. Zaefarian, F., Akbarpour, V., Habibi, M., & Kaveh, M. (2019). Impact of biochar and biofertilizers on photosynthetic pigments, yield, and nutrient content of peppermint. *Journal of Crops Improvement*, *21*(4), 407-422. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.22059/jci.2019.279035.2194
38. Zahedifar, M., & Najafian, S.H. (2015). Combined effect of soil applied iron and sulfur fertilisers on monoterpene content and antioxidant activity of *Satureja hortensis* L. extract. *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*, *38*(3), 361-374.
39. Zare Pak Ziaberi, S.S., & Majidian, M. (2022). Effects of zinc, boron, and sulfur on quantitative and qualitative characteristic of *Allium sativum* L. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, *38*(4), 592-607. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.22092/ijmapr.2022.358786.3174